

I-15

三要素パワーモデルの半剛結骨組構造解析への適用性

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 室蘭工業大学 正員 松 岡 健 一
 名古屋工業大学 正員 後 藤 芳 顯
 Purdue Univ. W.F. Chen

1. はじめに

構造物設計の基本的な考え方の趨勢は許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行する方向にある。限界状態設計法は適切な荷重評価とともに使用性および耐力に関する限界状態の算定が最も重要である。

一方、鋼骨組構造の場合には、従来まで梁-柱接合部を剛あるいはピン接合に仮定して設計計算が行われてきた。しかしながら、実際には溶接接合を除いた end-plate系、header-plate系、angle系接合は上記仮定の中間的かつ非線形な剛性特性を示すことが実験結果より明らかになっている。合理的な設計法確立のためには、これら接合部 $M-\theta_r$ 特性の耐力への影響を明確にすること、あるいはその非線形特性を考慮した解析手法を確立することが重要であるものと考えられる。

このような経緯からこれまで各種の接合部剛性評価モデルが報告されている。簡易的なモデルはlinearモデルであり、最も一般的なモデルはFrye-Morris¹⁾の多項式モデルである。また、著者等は次の二つのモデルを提案している。Chen-Luiのexponentialモデルを修正し curve-fitting により忠実に実験値を再現することの可能な修正exponentialモデル²⁾と Richard-Abbott の応力-歪評価式³⁾に基づく三要素powerモデルである。

また、著者等は接合部剛性評価式を骨組構造解析プログラム⁴⁾に組み込むために、angle系接合に限定して、 $M-\theta_r$ 曲線の主パラメータである接合部初期剛性 R_{ki} と限界曲げ耐力 M_u の定式化を行い^{5),6),7),8)}、三要素powerモデルの工学的な適用性について検討を行ってきた。すなわち、三要素powerモデルは上記パラメータの他、形状指数 n から構成されている。 R_{ki} 、 M_u は上記のように力学的に決定することができたが、形状指数 n を力学モデルによって決定することは非常に困難である。そのため著者等は次のような手順により作業を進めてきた。⁹⁾

- 1) 半剛結接合に関するデータベース¹⁰⁾を用いて三要素powerモデルと実験データの両者間に最小自乗法を適用して形状指数 n を決定する。
- 2) 実験データを直接用いた場合と1)で得られた評価式を用いた場合についての構造解析を行い、本powerモデルの妥当性を確認する。
- 3) 上記解析システムを設計計算レベルまで応用範囲を拡張するために、データベースを用いることなく、与えられた梁、柱、接合部パラメータに対して接合部剛性の評価を行う。この目的のために接合部剛性を変数とした形状指数 n に関する算定式を決定し、構造解析によってその妥当性を検証する。

これまでの作業において、3)において算定式の定式化や応用面で不具合が認められた。

本論文では、これらの不具合を修復することを試みたので報告する。ここで改良した点は下記2点である。

- 1) 形状指数 n の算定式における変数を塑性回転角 θ_0 を用いて係数の次元を一致させる。
- 2) 形状指数 n の算定式を常に正值になるようにする。

2. 三要素powerモデル

Applicability of Three-Parameter Power Model on Frame Analysis with Semi-Rigid Connection
 by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Yoshiaki GOTO and Wai-Fah CHEN

著者等は、評価モデルを単純なものとするために、Richard-Abbott が応力-歪関係のモデルに用いた四要素モデルを三要素型に縮小して用いている。無次元化した形で示すと以下になる。すなわち、

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \qquad \dots \dots (1)$$

但し、 $m = M/M_u$ 、 $\theta = \theta_t/\theta_0$ 、 $\theta_0 = M_u/R_{ki}$ である。

図-1 に式 (1) の概形図を示している。本モデルの大きな長所をあげると、

- 1) パラメータが少ないために設計計算への組込みが比較的容易である。
 - 2) 接合部モーメントM、相対回転角 θ_t 、接合部接線剛性を代数式で表すことができるため、非線形解析において計算時間を節約できる。
- 等である。

3. 形状指数nの決定

力学的に接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_u が算定可能なangle系接合に関して、次のような要領で形状係数nの算定式を決定した。

- 1) データベースに格納されている全ての実験データに関して、力学的に算定された R_{ki} 、 M_u を用いた場合の形状指数nを求める。
- 2) 著しく分散しているデータを除き、 $\log_{10}\theta_0$ を関数とする直線回帰式を各接合 typeについて求める。変数を θ_0 とすることにより回帰式に含まれる各係数が無次元量となり、左辺と一致させることができた。
- 3) 与えられた接合部パラメータに対して常に正值を与えるために、実験データから求められる最少の θ_0 よりも小さい領域に対しては一定値を与えることとする。

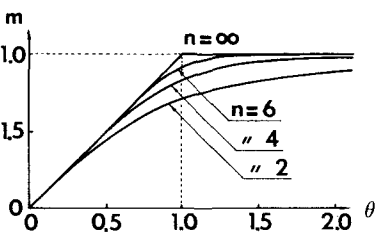


図-1 無次元三要素powerモデル

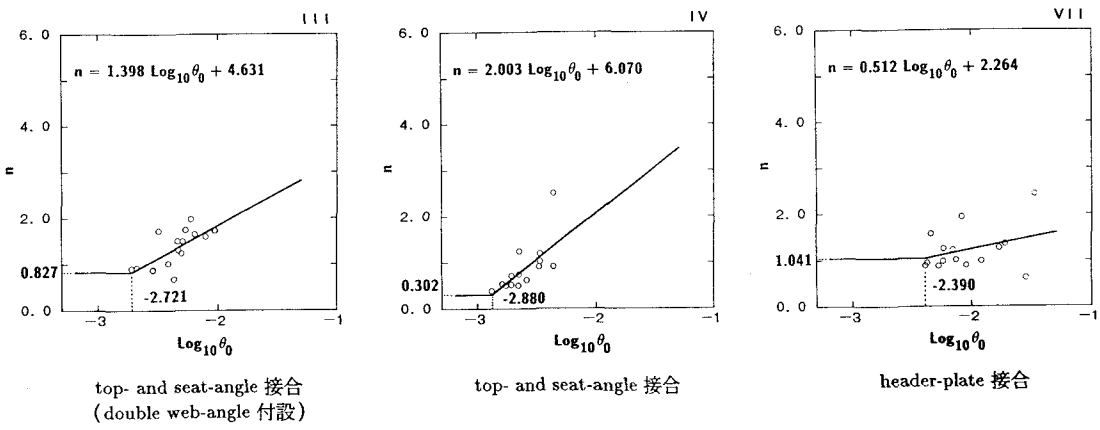
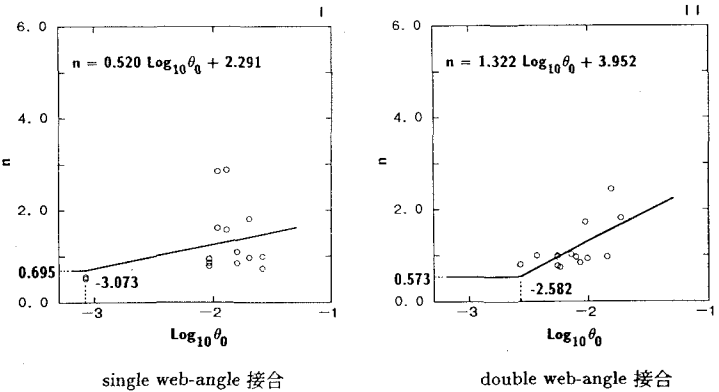


図-2 各接合typeに対する形状指数 nの分布状況と回帰曲線

上記手順によって求められた算定式の一覧を表－１に、図－２には各接合typeに対する形状指数 n の分布状況と算定式（回帰直線）を示している。

表－１ 各接合typeに対する形状指数算定式の一覧

接合タイプ	形状指数 n	データ数
single web-angle 接合	$0.520 \log_{10} \theta_0 + 2.291 \dots \log_{10} \theta_0 > -3.073$ $0.695 \leq -3.073$	16
double web-angle 接合	$1.332 \log_{10} \theta_0 + 3.952 \dots \log_{10} \theta_0 > -2.582$ $0.573 \leq -2.582$	14
top- and seat-angle 接合 (double web-angle 付設)	$1.398 \log_{10} \theta_0 + 4.631 \dots \log_{10} \theta_0 > -2.721$ $0.827 \leq -2.721$	17
top- and seat-angle 接合	$2.003 \log_{10} \theta_0 + 6.070 \dots \log_{10} \theta_0 > -2.880$ $0.302 \leq -2.880$	15
header-plate 接合	$0.512 \log_{10} \theta_0 + 2.264 \dots \log_{10} \theta_0 > -2.390$ $1.041 \leq -2.390$	15

4. 形状指数算定式の妥当性検討

3. で決定された形状指数算定式を含め、三要素powerモデルの工学的な妥当性を検討するために、後藤－ Chenが構造解析に用いている２層４径間骨組¹⁰⁾に、データベースに収録されているangle系接合を適用し構造解析を行った。数値的な検討は次の２

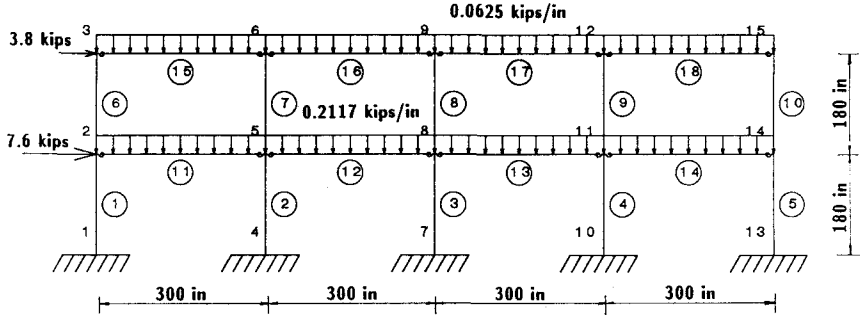
ケースについて行った。

すなわち、

1) 実験データから直接求められる形状指数 n を用いて構造解析を行い、変形や材端モーメントについての精度検討を行う。

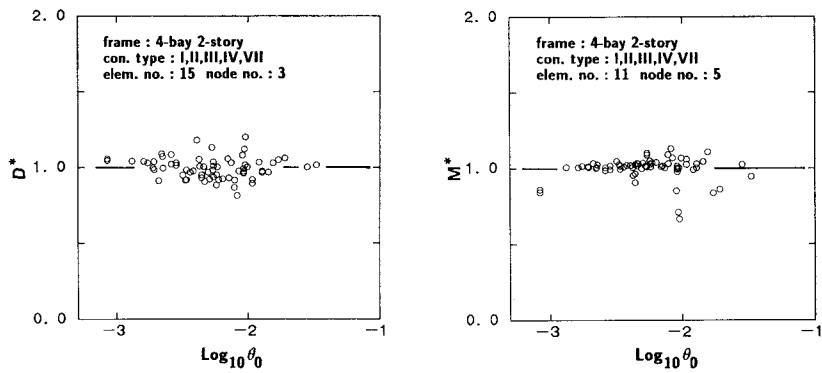
2) 表－１に示された形状指数算定式を用いて構造解析を行い、工学的な汎用性について検討を行う。

上記1),2)の精度検討は、接合部 $M-\theta_r$ に関する実験データを直接骨組に適用（構造解析時には実験データの代用として修正exponentialモデルを用いている）して節点変位および材端モーメントを求め、その値を基本とした無



All Roof Girders = W14 x 22, All Floor Girders = W18 x 46
Exterior Columns = W8 x 24, Interior Columns = W8 x 31

図－３ 解析に用いた半剛結骨組の形状寸法と作用荷重



図－４ 実験データから求めた n を用いた場合の応答結果（１）

次元量に変換し $\log_{10}\theta_0$ を横軸にとって整理している。ここでは無次元水平変位および材端モーメントをそれぞれ D^* 、 M^* として表すこととした。

構造解析は、先に後藤-Chen¹¹⁾が示した幾何学的非線形のみを考慮し、比較の変形が小さい場合に対し十分な精度を有する梁と柱の剛性方程式と非線形な半剛結接合を組み合わせた構造解析アルゴリズムを用いている。

図-3には解析に用いた骨組の形状寸法と使用鋼材の型番及び作用荷重を示している。

4.1 実験データから直接求めた形状指数 n を用いる場合

図-4に要素番号15、節点番号3の無次元水平変位、要素番号11、節点番号5の無次元材端モーメントの分布を、また、図-5に要素番号2、節点番号5および要素番号3、節点番号8の材端モーメントに関

する分布を示している。図より、図-4のモーメント分布において多少分散しているデータもあるが、両図とも1.0前後の狭い領域に多く分布していることがわかる。これより、実験データより直接求められた形状指数 n を用いる三要素powerモデルは、修正exponentialモデル同様実験データの代用として用いることが可能なものと考えられる。

4.2 形状指数算定式を用いる場合

図-6、7に4.1と同一の点における応答結果を示している。本解析結果は図-4、5の結果に比較して分散の程度が大きくなっているようである。また、図-6、7の結果について比較すると、図-7の結果は図-6の結果より

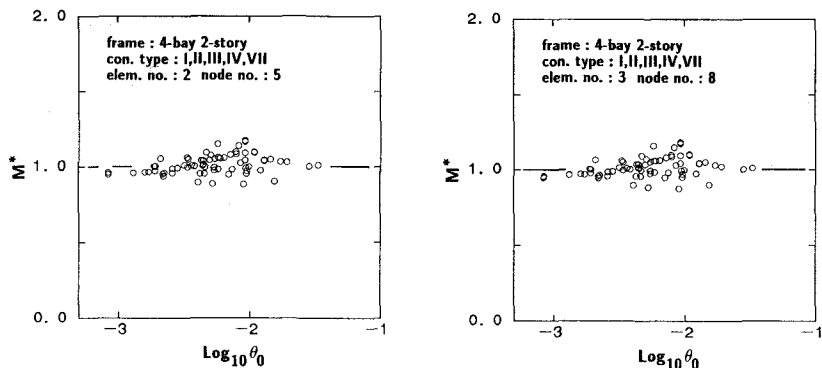


図-5 実験データから求めた n を用いた場合の応答結果(2)

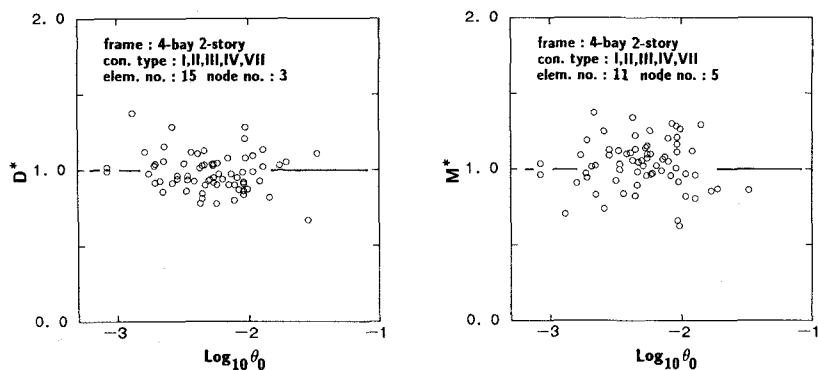


図-6 形状指数算定式を用いた場合の応答結果(1)

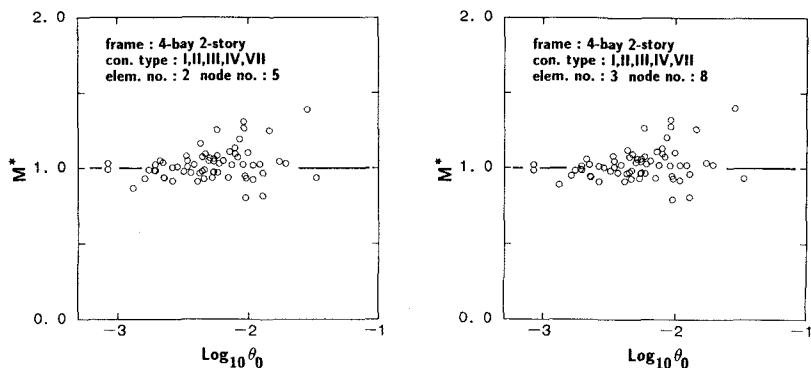


図-7 形状指数算定式を用いた場合の応答結果(2)

収斂性が向上しているようである。

骨組構造の場合には接合部剛性の大きさ（拘束）によって構造物の挙動が大きく変化する。構造全体の変形性能や梁、柱の設計計算の為に各ケースに対する割り増し係数を導入する方法も考えられるが、各応答結果がほぼ1.0を中心に分散しているようであり、煩雑さを避けることから表-1の算定式を直接用いる方が得策であるものと考えられる。

5. まとめ

骨組構造解析において、接合部剛性評価式を骨組構造解析プログラムに組み込み、与えられた梁、柱および接合部パラメータに対して接合部剛性の評価と構造全体の挙動解析や断面力の算定を可能にするために、angle系接合に限定してその評価式の定式化を行った。

本文では評価式として三要素powerモデルを採用している。その一パラメータである形状指数 n に関しては力学的に定式化が不可能であるため、ここではデータベースを用いて得られた値に対して塑性回転角 θ_0 を用いた直線回帰式とした。

剛性評価式の妥当性を検証するために、2層4径間骨組を用いた構造解析を行い、水平変位や材端モーメントについて、実験データを直接用いた場合と比較する形で検討を行った。検討結果、実験データ数が不足しているため回帰式に対してばらつきも大きいようであるが、無次元の水平変位および材端モーメントともほぼ1.0を中心にして分散しているようであり、本論文で求めた形状指数算定式を用いる三要素powerモデルは工学的に応用可能であるものと考えられる。

参考文献

1. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975). "Analysis of flexibly connected steel frames." Canadian J. Civ. Engrg., 2, 280-291.
2. Kishi, N. and Chen, W.F. (1986). "Steel connection data bank program." CE-STR-86-18, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
3. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975). "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.101, No.EM4, 511-515.
4. 岸徳光, 後藤芳顕, 松岡健一 (1990). "半剛結接合に関するデータベースを用いた平面骨組構造解析システムの開発." 構造工学論文集, 土木学会, 36A(3月), 1065-1072.
5. Kishi, N. et al. (1987). "Moment-rotation relation of single/double web-angle connections." CE-STR-87-18, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
6. Kishi, N. and Chen, W.F. (1987). "Moment-rotation relation of top- and seat angle connections." CE-STR-87-4, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
7. Kishi, N. et al. (1987). "Moment-rotation relation of top- and seat-angle with double web-angle connections." CE-STR-87-16, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
8. 岸徳光, Chen, W.F., 松岡健一, 能町純雄 (1989). "アングル材を用いた鋼梁-柱接合部の初期剛性と極限曲げ耐力の定式化." 構造工学論文集, 土木学会, 35A(3月), 97-105.
9. Kishi, N., Chen, W.F., Goto, Y. and Matsuoka, K.G. (1991). "Applicability of Three-Parameter Power Model to Structural Analysis of Flexibly Jointed Frames." Mechanics Computing in 1990's and Beyond, ASCE, 238-242.

10. Chen, W.F. and Kishi, N. (1989). "Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling." J. Struct. Div., ASCE, 115(ST1), 105-119.
岸徳光, Chen, W.F., 松岡健一, 能町純雄 (1989). "鋼梁-柱接合部の曲げ剛性評価実験に関するデータベース作成とその応用." 構造工学論文集, 土木学会, 35A(3月), 75-82.
11. Goto, Y. and Chen, W.F. (1987). "Second-order elastic analysis for frame design." J. Struct. Div., ASCE, 113(ST7), 1501-1519.
12. Goto, Y. and Chen, W.F. (1988). "On the computer-based design analysis for the flexibly jointed frames." J. Construction Steel Research, 8, Elsevier, 203-231.